

激光陀螺任意二位置寻北仪及误差分析

薛海建¹, 郭晓松¹, 周召发¹, 魏皖宁²

(1. 第二炮兵工程大学 兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025;
2. 陆军军官学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 介绍了一种激光陀螺任意二位置寻北仪, 可在一定程度上节省整个寻北过程的时间, 推导了全姿态下的寻北解算公式。为提高整个系统的寻北精度, 从理论上分析了陀螺漂移误差、系统圆周误差和转位误差对任意二位置寻北的影响, 建立了误差数学模型, 并提出了减小寻北误差的方法。仿真结果表明, 水平状态下的转位误差引起的寻北误差是一个常量, 大小为转位误差的一半; 为保证足够高的寻北精度, 要求寻北仪在使用过程中转角 $\mu \geq 40^\circ$, 纬度 $\varphi \leq 70^\circ$ 。寻北实验结果进一步验证了仿真结果的正确性, 与理论分析结果相吻合。

关键词: 激光陀螺; 寻北仪; 任意二位置; 误差分析

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1784-06

Arbitrary two-position north finder based on ring laser gyro and error analysis

Xue Haijian¹, Guo Xiaosong¹, Zhou Zhaofa¹, Wei Wanning²

(1. State Key Discipline Laboratory of Armament Launch Theory and Technology, the Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;
2. Army Office Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: An arbitrary two-position north finder based on ring laser gyro was introduced. It can save the time of north finder to a certain extent. The solver formula of north finder in the whole attitude was derived. In order to improve the accuracy of north finder, the impact of the various errors including the drift of gyro, system circumference error and position transposition error on the accuracy of the arbitrary two-position north finder was analyzed theoretically, and the mathematical model of errors were established, and the method of reducing the error was proposed. Simulation result indicates that the position transformation under the level state bringing error of north finder is a constant, and is half of the position transformation. In order to ensure an enough high accuracy of north seeking, it requires the corner $\mu \geq 40^\circ$ and the latitude $\varphi \leq 70^\circ$ of north finder in the course. The results of north finder further validate the correctness of the simulation results, consistent with the theoretical analysis.

Key words: ring laser gyro; north finder; arbitrary two-position; error analysis

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(41174162)

作者简介: 薛海建(1986-), 男, 博士生, 主要从事定位定向与基准传递方面的研究。Email: xhaijian2012@126.com

导师简介: 郭晓松(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事定位定向技术、光电瞄准技术等方面的研究。Email: gxs202@126.com

0 引言

激光陀螺(RLG)是利用环形腔内顺逆时针两束激光的 Sagnac 效应实现对角速度的测量的新型陀螺仪,具有耐冲击、寿命长、动态范围大、瞬时启动、角分辨率高等优点,在新一代捷联式惯性导航系统中具有广泛的应用。激光陀螺的一个重要应用是指北,可提供方位基准,被广泛应用到军事和民用的多个领域。目前,二位置、四位置和多位置寻北仪^[1-6]因其各自的优点得到了广泛的应用,对连续旋转法也有一定的研究^[7-8],但仍处于探索阶段。

介绍了一种更为实用且简单的任意二位置激光陀螺寻北仪,通过在任意两个位置上对陀螺仪输出信号进行采集即可完成寻北,在一定程度上节省了整个寻北过程的时间^[9]。在陀螺寻北仪中,存在着惯性器件误差、安装误差、载体振动等多

种因素影响寻北精度^[10-13],为了提高系统精度,根据寻北原理重点分析了陀螺漂移误差、系统圆周误差和转位误差对寻北误差的影响机理,建立了误差数学模型,推导了误差方程并通过仿真实验进行了定量分析,深入探讨了任意二位置寻北到底最小角度为多少才能保证足够的寻北精度以及是否两个位置之间的相差可以无限小的问题。最后,通过激光陀螺任意二位置寻北实验验证了理论分析结果的正确性。

1 寻北原理

设: n 系(地理坐标系)为北西天坐标系, ON 、 OW 、 OT 轴分别指北、西、天; b 系为载体坐标系,初始时与地理坐标系重合,载体的姿态角 α 、 θ 、 γ 分别表示方位角、俯仰角和横滚角,可得载体坐标系与地理坐标系之间的转换关系为:

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \theta & \sin \alpha \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \theta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \theta \sin \gamma \\ \cos \alpha \sin \theta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma & \sin \alpha \sin \theta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma & \cos \theta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

考虑陀螺常值漂移 ε_0 和随机漂移项 ε ,可得陀螺在初始位置的输出为:

$$\omega_x(0^\circ) = \omega_N \cos \alpha \cos \theta - \omega_T \sin \theta + \varepsilon_{x0} + \varepsilon_x(0^\circ) \quad (1)$$

$$\omega_y(0^\circ) = \omega_N (\cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + \omega_T \cos \theta \sin \gamma + \varepsilon_{y0} + \varepsilon_y(0^\circ) \quad (2)$$

式中: ω_N 和 ω_T 分别表示地球自转角速度在 n 系中的北向分量和天顶分量; $\omega_N = \omega_{ie} \cos \varphi$ 、 $\omega_T = \omega_{ie} \sin \varphi$, ω_{ie} 表示地球自转角速度, φ 表示当地纬度。

因为载体静止,加速度计仅敏感的是地球重力加速度 g ,忽略加速度计漂移,可得加速度计输出为:

$$a_x = g \sin \alpha \sin \gamma \quad (3)$$

$$a_y = -g \cos \theta \sin \gamma \quad (4)$$

由以上两式可计算出 θ 和 γ 。

待系统在初始位置完成信号采集后,控制转台绕 z_b 轴转动任意角度 μ ,设在初始状态下机械转动系为 m 系,与载体坐标系 b 系重合,转动后的机械转动系为 m^1 系,则 m 系到 m^1 系的方向余弦矩阵为:

$$C_m^{m^1} = \begin{bmatrix} \cos \mu & \sin \mu & 0 \\ -\sin \mu & \cos \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则可得陀螺在 m^1 系(位置2)的输出为:

$$\vec{\omega}_m^{m^1} = C_m^{m^1} \cdot C_n^b \cdot \vec{\omega}_{ie}^n = C_m^{m^1} \cdot C_n^b \begin{bmatrix} \omega_N \\ 0 \\ \omega_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_x(\mu) \\ \varepsilon_y(\mu) \\ \varepsilon_z(\mu) \end{bmatrix} \quad (5)$$

故陀螺在位置2测得的角速度为:

$$\omega_x(\mu) = \cos \mu (\omega_N \cos \alpha \cos \theta - \omega_T \sin \theta) + \sin \mu [\omega_N (\cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + \omega_T \cos \theta \sin \gamma] + \varepsilon_{x0} + \varepsilon_x(\mu) \quad (6)$$

$$\omega_y(\mu) = -\sin \mu (\omega_N \cos \alpha \cos \theta - \omega_T \sin \theta) + \cos \mu [\omega_N (\cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + \omega_T \cos \theta \sin \gamma] + \varepsilon_{y0} + \varepsilon_y(\mu) \quad (7)$$

把公式(1)、(2)和公式(6)、(7)分别对应相减并忽略随机漂移可得:

$$\begin{aligned} \bar{\omega}_x(\mu) &= \omega_x(0^\circ) - \omega_x(\mu) = \omega_N \cos \alpha \cos \theta - \omega_T \sin \theta - \\ &\quad \{ \cos \mu (\omega_N \cos \alpha \cos \theta - \omega_T \sin \theta) + \\ &\quad \sin \mu [\omega_N (\cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + \\ &\quad \omega_T \cos \theta \sin \gamma] \} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{\omega}_y(\mu) = \omega_y(0^\circ) - \omega_y(\mu) = \omega_N (\cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) +$$

$$\begin{aligned} &\omega_T \cos \theta \sin \gamma - \{-\sin \mu (\omega_N \cos \alpha \cos \theta - \omega_T \sin \theta) + \\ &\cos \mu [\omega_N (\cos \alpha \sin \theta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma) + \\ &\omega_T \cos \theta \sin \gamma]\} \end{aligned} \quad (9)$$

联立公式(8)、(9)可解得方位角 α 为:

$$\begin{aligned} \alpha = &\arctan[\bar{\omega}_x (\sin \theta \sin \gamma + \sin \mu \cos \theta - \cos \mu \sin \theta \sin \gamma) - \\ &\bar{\omega}_y (\cos \theta - \cos \mu \cos \theta - \sin \mu \sin \theta \sin \gamma) + \\ &2\omega_T \sin \gamma (1 - \cos \mu)] / [-\bar{\omega}_x (\cos \mu - 1) - \bar{\omega}_y \sin \mu + \\ &2\omega_T \sin \theta (\cos \mu - 1) \cos \gamma] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\bar{\omega}_x$ 、 $\bar{\omega}_y$ 分别为陀螺 X、Y 敏感轴在前后任意两个位置上的测量数据之差; θ 、 γ 可由公式(3)、(4)计算得到。

当 $\theta=0$ 、 $\gamma=0$ 时, 即水平状态下, 方位角为:

$$\alpha = \arctan \frac{\bar{\omega}_x \sin \mu - \bar{\omega}_y (1 - \cos \mu)}{\bar{\omega}_x (1 - \cos \mu) - \bar{\omega}_y \sin \mu} \quad (11)$$

通过上述推导过程可以看出, 传统二位置寻北方法只是任意二位置寻北方法的一个特例, 在实际工作中, 可灵活选择两个测量位置间的相位差, 消除陀螺常值漂移的同时在一定程度上缩短寻北时间。

2 寻北误差分析

上节介绍了任意二位置寻北的基本工作原理, 但是任意二位置最小角度为多少才能保证足够的寻北精度以及两个位置之间的相差是否可以无限小是一个值得探讨的问题。激光陀螺寻北仪的寻北误差主要包括陀螺漂移误差、系统圆周误差、转位误差等。下面对水平状态下的各种误差进行详细分析。

2.1 陀螺漂移

由寻北原理和算法可知, 陀螺常值漂移对寻北精度不产生影响。若陀螺漂移有变化, 则会产生一定的解算误差。为讨论陀螺漂移对寻北精度的影响, 将公式(11)在 $\bar{\omega}_x$ 、 $\bar{\omega}_y$ 处展开成泰勒公式并忽略二阶小量可得:

$$\partial \alpha = \frac{\bar{\omega}_y}{\omega_x^2 + \omega_y^2} \varepsilon_x + \frac{\bar{\omega}_x}{\omega_x^2 + \omega_y^2} \varepsilon_y \quad (12)$$

公式(8)、(9)在水平状态下可转化为:

$$\bar{\omega}_x = \omega_N \cos \alpha - \omega_N \cos \alpha \cos \mu + \omega_N \sin \alpha \sin \mu \quad (13)$$

$$\bar{\omega}_y = -\omega_N \sin \alpha + \omega_N \cos \alpha \sin \mu + \omega_N \sin \alpha \cos \mu \quad (14)$$

将公式(13)、(14)代入公式(12)可得:

$$\partial \alpha = [-\sin \alpha + \cos \alpha \sin \mu + \sin \alpha \cos \mu] \varepsilon_x + (\cos \alpha -$$

$$\cos \alpha \cos \mu + \sin \alpha \sin \mu) \varepsilon_y / 2\omega_N (1 - \cos \mu) \quad (15)$$

对上式分析可知, 陀螺漂移对寻北精度的影响与任意二位置的转角和纬度有关, 实际寻北时, 转位误差、纬度误差及陀螺漂移会相互耦合影响寻北精度。设 RLG 的零漂 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.01^\circ/\text{h}$, 方位角 $a = 45^\circ$, 则根据上式可得 RLG 寻北仪的寻北误差随转角及纬度的变化的曲线如图 1 所示。

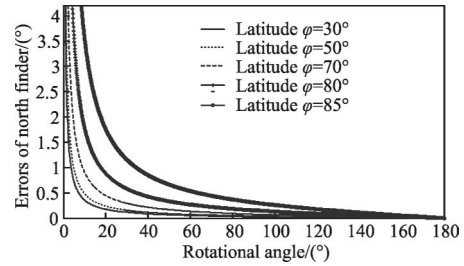


图 1 寻北误差随转角及纬度的变化的曲线

Fig.1 Curve of north finder error varies with rotational angle and latitude

由图可见, 随着任意二位置寻北的转角越大, 陀螺漂移在相同纬度下引起的寻北误差越小, 转角为 180° 时达到最小; 当转角大于 40° 以后, 同一纬度下的陀螺漂移引起的寻北误差变化趋于平稳; 随着纬度的增加, 陀螺漂移在相同转角下引起的寻北误差增大; 当纬度大于 70° 时, 相同转角下的陀螺漂移引起的寻北误差会迅速增大。

因此, 在实际工作过程中, 为保证足够高的寻北精度, 一般要求转角 $\mu \geq 40^\circ$, 纬度 $\varphi \leq 70^\circ$, 以减小陀螺漂移对寻北精度的影响。

2.2 系统圆周误差

在理论上, 地球表面某点水平地速的大小随方位角按照正弦规律而变化, 因此激光陀螺仪在该点水平面的圆周上敏感地球自转分量是一个以 2π 为周期的正弦曲线和余弦曲线, 如图 2 所示。图中横坐标表示圆周上理论的方位角, 纵坐标表示陀螺仪在

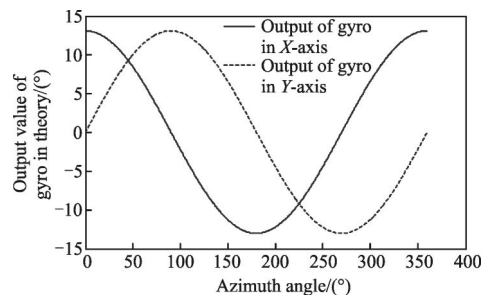


图 2 激光陀螺仪的理论输出曲线

Fig.2 Theoretical output curve of RLG

每个方位角的理论输出量。

由于实际工作中陀螺仪的输出与理论输出有误差存在,偏离了理论的敏感量,必然导致寻北仪在某地的圆周上寻北解算结果与实际值之间的误差与方位角有关。设 RLG 的零漂 $\varepsilon_x=\varepsilon_y=0.01(^{\circ})/h$,则根据公式(15)可得 RLG 寻北仪在某地的圆周上的寻北误差曲线如图 3 所示,图 3(a)为转角 $\mu=90^{\circ}$,纬度取不同值时的寻北误差变化曲线,图 3(b)为纬度 $\varphi=30^{\circ}$,转角取不同值时的寻北误差变化曲线。

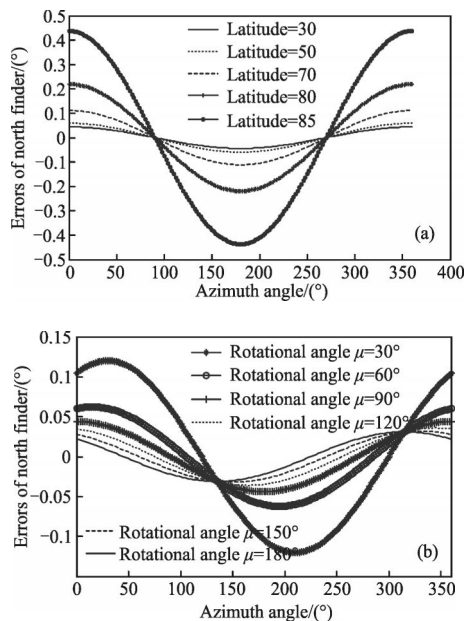


图 3 寻北仪在某地的圆周上的寻北误差曲线

Fig.3 Error curve of north finder in a place on circumference

由图可见,寻北仪在某地的圆周上寻北解算结果与实际值之间的误差也是一条以 2π 为周期的曲线;随着纬度的升高和转角的减小,寻北误差增大;纬度的变化只影响寻北误差曲线的幅值,而不影响相位,当纬度大于 70° 时,误差曲线的幅值会迅速增大;转角的变化既影响寻北误差曲线的幅值又影响相位,当转角过小时($\leq 40^{\circ}$),误差曲线的幅值也会迅速增大;陀螺仪的敏感轴的输出误差如果达到 $0.01(^{\circ})/h$,在 $\mu=90^{\circ}$ 、 $\varphi=50^{\circ}$ 时,最大寻北误差可达到 0.0593° ;为保证足够高的寻北精度,一般要求转角 $\mu \geq 40^{\circ}$,纬度 $\varphi \leq 70^{\circ}$,这与上节讨论得到的结论是一致的。

因此,在实际使用过程中,应尽量避免任意二位置寻北的初始方位角在寻北误差曲线的峰值附近,以减小寻北误差。例如,从图 3(a)可以发现:当寻北

的转角为 90° 时,寻北误差曲线的峰值出现在 0° 和 180° 的方位角位置,因此在使用过程中,只要任意二位置寻北的两位置转角为 90° ,可以在每次寻北开始时,先利用单位置法进行快速粗略定向,求出粗略的北向后控制转台转到 90° 或 270° 方位角附近再进行任意二位置采样便可以进行北向的精确测量。

2.3 转位误差

由于寻北系统的任意二位置寻北方案是通过转位机构来实现的,转位机构会有误差存在,从而引起惯性敏感元件的测量误差,影响系统的寻北精度。为分析转位误差对寻北精度的影响,将公式(11)两边对转角 μ 求导可得:

$$\frac{d\alpha}{d\mu} = \frac{(\bar{\omega}_x^2 + \bar{\omega}_y^2)(\cos\mu - 1)}{2(\bar{\omega}_x^2 + \bar{\omega}_y^2)(1 - \cos\mu)} = -\frac{1}{2} \quad (16)$$

即

$$d\alpha = -\frac{1}{2} d\mu \quad (17)$$

由此可见,水平状态下转位误差引起的寻北误差为转位误差的一半,这与传统的二位置寻北方法得出的结论是一致的^[3]。据此,为保证足够高的寻北精度,应控制转位机构的转位精度优于 $10''$ 。

3 寻北实验

利用激光陀螺、高精度转台、主控计算机等构成寻北仪原理样机,其中激光陀螺的零偏稳定性和重复性均优于 $0.005(^{\circ})/h$;高精度转台具有旋转和俯仰两个自由度,且旋转和俯仰分辨率均高达 $1''$ 。实验时,通过转台的水平、倾斜传感器确保陀螺的两敏感轴严格调平。

寻北开始时,待系统通电 20 min 后开始采集数据,分别采集陀螺在初始位置,相差 5° 、 15° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 150° 以及对径等 9 个位置的输出信号,每个位置的采样时间为 20 s,相对于第一个位置可以解算出初始位置的 8 个方位角值,进行 7 次重复性寻北实验,统计结果如下表所示。

从表 1 的寻北结果可以看出,当转角 $\mu=5^{\circ}$ 时,寻北标准差约为 0.15° ,精度最差;当转角 $\mu=180^{\circ}$ 时,寻北标准差约为 0.0071° ,精度最优;除在转角 120° 寻北误差有一个小的跳跃外,整体变化趋势是随着转角增大,寻北标准差减小,转角为 180° 时达到最小,当转角大于 40° 以后,寻北标准差变化趋于平稳,这

表 1 激光陀螺任意二位置寻北结果

Tab.1 North finding results of laser gyro in random two positions

Times	North finding result of different phase difference in random two positions/(°)							
	$\mu=5^\circ$	$\mu=15^\circ$	$\mu=30^\circ$	$\mu=60^\circ$	$\mu=90^\circ$	$\mu=120^\circ$	$\mu=150^\circ$	$\mu=180^\circ$
1	0.639 464	0.758 253	0.741 775	0.732 995	0.732 882	0.740 509	0.745 348	0.747 747
2	0.446 737	0.667 559	0.741 099	0.717 140	0.724 947	0.727 144	0.750 470	0.742 016
3	0.631 326	0.659 040	0.742 092	0.744 860	0.732 750	0.743 014	0.729 202	0.738 661
4	0.854 385	0.801 183	0.802 112	0.758 895	0.726 397	0.738 054	0.745 769	0.745 701
5	0.470 573	0.696 180	0.707 758	0.726 248	0.710 256	0.732 474	0.739 445	0.733 733
6	0.766 280	0.772 637	0.790 036	0.748 614	0.724 019	0.753 376	0.748 881	0.733 532
7	0.535 140	0.652 966	0.697 170	0.735 687	0.720 835	0.758 900	0.757 086	0.728 151
Standard deviation/(°)	0.150 770	0.060 833	0.038 712	0.014 140	0.007 731	0.011 145	0.008 869	0.007 121

也与第 3 节的理论分析结果相吻合；产生转角 120° 处寻北误差有一个小跳跃的现象，经初步分析是由于陀螺随机漂移或外部干扰而引起的偶然事件。

4 结 论

介绍了一种激光陀螺任意二位置寻北仪结构，结构简单实用，给出寻北原理，为深入探讨任意二位置寻北最小角度为多少才能保证足够高的寻北精度以及两个位置之间的相差是否可以无限小的问题，重点分析了陀螺漂移误差、系统圆周误差、转位误差等对寻北精度的影响，推导了误差方程并建立了误差数学模型。仿真结果表明：水平状态下的转位误差引起的寻北误差是一个常量，大小为转位误差的一半；为保证足够高的寻北精度以满足工程需求，要求在使用过程中任意二位置寻北仪的转角 $\mu \geq 40^\circ$ ，纬度 $\varphi \leq 70^\circ$ 。寻北实验结果表明：随着转角增大寻北标准差减小；为保证足够高的寻北精度以满足工程需求，要求在使用过程中任意二位置寻北仪的转角 $\mu \geq 40^\circ$ ，与理论分析结果相吻合。

参考文献：

- [1] Yang Jianhua, Zhang Qiuli, Yang Hanrui, et al. The improvement of FOG north-seeker two-position north determining scheme [J]. *IEEE international Conference on Information and Automation*, 2010: 2248-2251.
- [2] Jiang Qingxian, Ma Xiaohui, Chen Xiaobi, et al. North determining scheme by two-position for a FOG north seeker [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2006, 14(3): 1-5. (in Chinese)
蒋庆仙, 马小辉, 陈晓璧, 等. 光纤陀螺寻北仪的二位置寻
- 北方方案[J]. *中国惯性技术学报*, 2006, 14(3): 1-5.
- [3] Gao Maolin, Zhao Zhong, Zhang Jun. Two-position gyro-based north seeker and error analysis of position transformation [J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(1): 70-71. (in Chinese)
高茂林, 赵忠, 张钧. 二位置陀螺寻北仪及转位误差分析 [J]. *计算机测量与控制*, 2006, 14(1): 70-71.
- [4] Zhang Yan, Cao Juliang, Wu Wenqi, et al. The analysis of turntable error and arithmetic design for north-finder based on rate biased RLG [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 383-390.
- [5] Shen Jun, Miao Lingjuan, Wu Junwei, et al. Application and compensation for startup phase of FOG based on RBF neural network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 119-124. (in Chinese)
沈军, 缪玲娟, 吴军伟, 等. 基于 RBF 神经网络的光纤陀螺启动补偿及应用 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 119-124.
- [6] Li Min, Wang Zhiqian, Huang Bo. Design and realization of multi-position strap-down north-seeking instrument based on dynamically tuned gyro [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010(5): 19-21. (in Chinese)
李敏, 王志乾, 黄波. 基于动调陀螺的多位置捷联寻北仪研制 [J]. *仪表技术与传感器*, 2010(5): 19-21.
- [7] Xu Haigang, Guo Zongben. Design of a practical rotation modulated gyro north-finder [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(5): 616-619. (in Chinese)
徐海刚, 郭宗本. 一种实用旋转调制式陀螺寻北仪的设计 [J]. *兵工学报*, 2010, 31(5): 616-619.
- [8] Bai Yunchao, Li Xueqin, Ma Xiaohui, et al. High-precision north determining scheme based on rotation-modulation technology [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010,

- 18(4): 421-424. (in Chinese)
白云超, 李学琴, 马小辉, 等. 采用旋转调制技术的高精度陀螺寻北方案[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(4): 421-424.
- [9] Xue Haijian, Guo Xiaosong, Zhou Zhaofa. The method and data processing of arbitrary two-position north finder[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(4): 559-566. (in Chinese)
薛海建, 郭晓松, 周召发. 一种任意二位置陀螺寻北模型及其数据处理技术[J]. 兵工学报, 2014, 35(4): 559-566.
- [10] Qi Yutong, Chen Fengyu, Su Haibin. Error analysis of a dynamically tuned gyro strapdown north finder [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, 8(3): 331-336.
- [11] Wang Lidong, Wang Xiaoxiao, Zhang Chunxi. The multi-position north-seeking error analysis of FOG north-seeker [J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2007, 29 (1): 42-45. (in Chinese)
王立冬, 王夏霄, 张春熹. 光纤陀螺寻北仪多位置寻北误差分析[J]. 压电与声光, 2007, 29(1): 42-45.
- [12] Wang Zhiqian, Zhao Jiyin, Xie Mujun, et al. Design and accuracy analysis for a fast high precision independence north seeking [J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29 (2): 164-168. (in Chinese)
王志乾, 赵继印, 谢慕君, 等. 一种快速高精度自主式寻北仪设计及精度分析[J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 164-168.
- [13] Zhang Z J, Sun J Y, Wu K Y. Error analysis and test study of fiber optic gyroscope north-finder[C]//SPIE, 2005, 5634: 611-618.